第27卷 第1期 腐蚀科学与防护技术 Vol.27 No.1
2015年1月 CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY Jan. 2015

专题介绍

金属材料大气腐蚀试验相关性与寿命预测研究现状

曾佳俊 周学杰 吴 军 李冬冬 罗 睿 张三平

武汉材料保护研究所 材料表面保护技术湖北省重点实验室 武汉 430030

摘要:综述了当前金属材料大气腐蚀试验的研究方法,重点叙述了大气腐蚀试验的相关性分析,以及金属材料服役寿命预测的研究方法。其中多因子复合循环腐蚀试验是今后室内加速腐蚀试验的发展方向,将现代化的计算机数据处理技术运用到相关性分析中,并同现代数学分析方法结合起来,不断加深对人工神经网络技术和灰色系统理论技术等非线性数学分析方法的研究,并应用于大气腐蚀科学研究中,从而深入探索材料大气腐蚀的行为规律,提高预测材料服役寿命的准确性。

关键词:大气腐蚀 腐蚀试验相关性 寿命预测

中图分类号:TG172.3 **文献标识码**:A **文章编号**:1002-6495(2015)01-0090-05

1 前言

大气腐蚀是材料同大气环境相互作用而发生变质或破坏的过程。当前大气环境中使用最多最广的是金属材料,因此金属材料大气腐蚀发生最为普遍。据统计,金属材料每年因大气腐蚀造成的经济损失约占总腐蚀损失的一半以上[1]。大气环境中的污染因素众多,腐蚀受到在气相、液相和固相界面间化学、电化学以及物理的复杂过程影响[2]。较为系统的大气腐蚀研究已有百年的历史,然而许多金属材料腐蚀行为机理仍不是十分清楚,特别是腐蚀预测上,尚无完整的科学方法。因此,深入了解金属材料在大气环境下的腐蚀行为规律和影响因素;持续对金属材料进行户外大气环境下暴露试验和室内加速腐蚀试验,通过有效的研究方法建立室内外大气腐蚀试验的相关性,并对金属材料在不同大气环境下的服役寿命进行预测,是一项基础性、实用性非常突出的研究方向。

2 户外暴露腐蚀试验

户外暴露腐蚀试验是大气腐蚀研究中最常用的试验方法,获得的结果能真实地反应材料在实际大气环境下的腐蚀情况[3-7],但是,由于大气暴露试验周期长,试验区域性强,且在较长时间试验中,大气环境会因为人类的生产活动而产生变化,从某种角度衡量,其试验结果仍不具普适性,这样又促使人们开展室内加速腐蚀试验研究[8-11],以推测户外长期暴露试验的结果。在目前的研究技术条件下,加速试验还不能简单地代替大气腐蚀暴露试验[12-15],这使得室内加速腐蚀试验与大气暴露试验的相关性研究成为大气腐蚀研究领域的关键之一。

美国材料试验学会 (ASTM) 从1906年开始建立材料大气腐蚀试验网,进行多种材料的大气腐蚀试验,自20世纪20年代以来,大部分工作都致力于研究金属在自然大气中的腐蚀[16]。我国材料大气腐蚀试验开始于20世纪50年代中期,1980年我国展开了常用材料大气、海水、土壤环境中长期、系统的腐蚀试验研究,现建有30个国家环境腐蚀试验站,已取得了大量有价值的研究成果。

3 室内加速腐蚀试验

室内加速腐蚀试验是通过人为强化一种或几种腐蚀因素,以期在短时间内确定金属发生腐蚀的倾向,或是评估某种材料在指定条件下相对耐蚀性的一种方法,主要应用于评价金属材料耐蚀性及涂镀层保护性能,以便于选材或评比防护方法的优劣。加速腐蚀试验中,放大了某种腐蚀因素,使其腐蚀过程获得加速性,但同时也降低了模拟的效果。现有的加速腐蚀试验方法有盐雾试验、湿热腐蚀试验、腐蚀气体试验和干湿周浸循环腐蚀试验等,但试验条件相对简单。目前也正试图不断改进试验条件,科学合理的选择试验条件和参数,使试验结果与实际大气环境暴露腐蚀试验结果具有较好的相关性。具体试验方法的选择也还应根据试验材料的性质和试验要求来确定。

大气腐蚀具有复杂性和多样性的特点,一般都

定稿日期:2014-04-30
作者简介:曾佳俊,男,1989年生,硕士生
通讯作者:曾佳俊,E-mail:352091180@99.com,研究方向为材料腐蚀与防护
DOI:10.11903/1002.6495.2014.104

是由多种影响因素共同作用的结果。湿热腐蚀试验和盐雾试验均只考虑了温度、湿度以及盐粒等少数因素对材料大气腐蚀的影响；干湿周浸循环腐蚀试验则主要是抓住了材料大气腐蚀的基本特点来研究材料大气腐蚀的行为机理；腐蚀气体试验主要应用于材料在工业大气环境中耐蚀性评价。从而促使加速腐蚀试验不断向控制多因素方向发展。多因子循环腐蚀试验不但考虑了大气腐蚀的基本特点，而且还考虑了其它主要影响因素，是目前相对最为真实地再现实际自然环境的室内加速试验方法。如北京航空材料研究院研制的8因子加速试验装置，不仅能够模拟材料在自然环境条件下干湿交替过程，而且可通入腐蚀性气体，具有光老化及腐蚀综合试验功能，现已成功应用于18种标准腐蚀试验中。多因子复合循环腐蚀试验考虑因素众多，向多因子复合循环腐蚀试验方向发展将是今后室内加速腐蚀试验的发展方向。在汽车行业中，针对不同产品及使用环境，制定了多种循环腐蚀试验方法，这方面的应用走在了前面。

4 室内外大气腐蚀试验相关性研究

4.1 相关性分析

大气腐蚀试验相关性研究主要是对户外大气环境下暴露腐蚀试验和室内加速腐蚀试验结果进行对比，通过定性分析和定量分析评定其相关性，以期找到可以推测材料产品在实际使用环境的耐蚀性寿命，指导设备维修周期的制定。

4.1.1 定性分析　　定性分析主要是对试验后金属腐蚀形貌及腐蚀产物和金属腐蚀过程的腐蚀机理进行分析，通常有图表分析和腐蚀机理对比分析两种。

(1) 图表分析

图表法是相关性研究中应用最早的一种比较直观的分析方法[17]，它是将户外实际大气环境下暴露腐蚀试验和室内加速腐蚀试验结果绘图或制成表格的形式，根据图表中数据间的差异及变化趋势，分析材料性能变化规律，从而评估其相关性。

(2) 腐蚀机理对比

户外实际大气环境下暴露腐蚀试验和室内加速腐蚀试验的腐蚀机理一致才是保证相关性良好的本质。文邦伟等[18]研究装甲用钢在酸雨大气环境下自然暴露与人工模拟加速试验的相关性中采用腐蚀机理对比定性分析其相关性，通过对比分析两种试验的腐蚀产物宏观和微观物相结构，推断其作用机理基本一致，认为该模拟加速试验模拟性良好，两种试验的相关性较好。

4.1.2 定量分析　　定量分析主要是从腐蚀动力学角度出发，通过回归分析、秩相关系数或灰色关联度等分析其相关性。

(1) 回归分析

回归分析是对腐蚀试验结果分析，建立相应的大气腐蚀动力学特征方程，分析其函数关系模型，以达到相关性定量分析的目的。王振尧等[19]通过户外大气环境下暴露腐蚀试验和试验室的浸渍干燥湿润复合循环试验，并结合腐蚀产物的表面分析，研究了20钢、Q235钢、CortenA和06CuP等4种钢在沈阳地区的大气腐蚀规律和模拟大气腐蚀过程的腐蚀规律，并采用回归分析法得到4种钢在大气暴露腐蚀试验和室内模拟加速腐蚀试验中的腐蚀规律公式 $\Delta W = Kt^n$，从而可以求得室内外试验后得到相同腐蚀量所对应的时间关系，即：

$$\Delta W_{外} = \Delta W_{内} \tag{1}$$

$$K_{外} t_{外}^{n_{外}} = K_{内} t_{内}^{n_{内}} \tag{2}$$

其中，$t_{外}$和$t_{内}$对应的时间分别为月和小时，两边取对数、移项得：

$$\ln t_{外} = (n_{内} \ln t_{内} + \ln K_{内} - \ln K_{外}) / n_{外} \tag{3}$$

结果表明：在大气暴露腐蚀试验和室内加速腐蚀试验中，4种钢的腐蚀产物都具有不同程度的保护性能，室内外腐蚀结果具有较好的相关性。

(2) 秩相关系数分析

Spearman 秩相关系数 (rhos) 是将两要素的样本值按数据大小排列位次，以各要素的样本值位次来代替实际数据而求得的一种统计量，是一种非参数线性相关分析方法。该方法适用范围广、简单、实用性强。具体计算方法[20]如下：设 X_i，Y_i分别为自然环境试验与室内模拟加速试验后测得的性能数据，x_i，y_i分别为X_i，Y_i的秩，d_i为秩差。计算步骤如下：

秩的计算：两种试验方法测得的数据按照大小统一排序，每个数据所对应的序数为它的秩。

秩差的计算：
$$d_i = x_i - y_i \tag{4}$$

秩相关系数的计算：
$$r_s = 1 - \frac{6\sum_i^n d_i^2}{n(n^2-1)} \tag{5}$$

式中：n代表材料进行模拟加速腐蚀试验和实际大气环境下腐蚀试验的材料数量。秩相关系数值$r_s \leq 1$，越接近1说明相关性越好。r_s的大小反映了2种试验方法的结果对材料优劣顺序的差异规律的密切程度。

曾华波等[21]通过在天然海水中加H_2O_2，对镍铬系船体钢 (X_1、X_2、X_3)、锰钢 (E36) 和碳钢 (Q235) 进行室内模拟加速腐蚀试验，利用Spearman秩相关系

数法得到了相关系数 R (见图1)。

由图1可知，前3个周期内，秩相关系数均大于或等于0.80，说明两种腐蚀试验方法具有较好的相关性。后面两个周期的秩相关系数逐渐降低，这两种试验方法有差别，其原因可能随着浸泡时间的延长，试样表面出现了大量的腐蚀产物，阻碍了 O_2 和 H_2O_2 在船体钢表面的扩散，影响了船体钢的腐蚀速率。

(3) 灰色关联度分析

灰色关联度分析是将不同因素间发展趋势的相似或相异程度，即"灰色关联度"，作为衡量因素间关联程度的一种方法[22]。将其引入相关性分析研究中，主要用于研究多种不同室内模拟加速腐蚀试验间的差异，从而选择出最佳试验方案。以实际大气环境下的腐蚀试验数据作为母系列，各种室内加速腐蚀试验数据作子系列，计算出各自的灰色关联度 R_i，按大小顺序排列，关联度最大的相关性最好。

牟献良等[23]对碳钢和低合金钢进行了中性盐雾和酸性盐雾试验，并与万宁和江津试验站的海洋大气腐蚀试验结果作对比分析。在试验中用灰色关联度分析法对海洋大气暴露试验和盐雾试验结果进行了相关性分析，并且认为盐雾试验的加速倍率是随时间变化的，即是呈动态变化的。碳钢和低合金钢在中性盐雾试验和酸性盐雾的试验结果与海洋大气暴露试验相比，均具有加速腐蚀性的同时具有相关性。

4.2 当前相关性研究存在的主要问题及改进研究

对于不同的试验方法、设备、材料、暴露试验地点及其环境类型，室内外腐蚀试验具有不同的相关性，为此，给相关性研究带来了一个巨大的难题，进而阻碍了相关性研究成果的广泛推广和应用。当前大气腐蚀试验具有广泛性的相关性研究结果还并不理想，这主要是由于各地区大气成分、含量、干湿状态及污染程度千差万别，单一因素和多因素复合作用于材料的大气腐蚀机理目前还不十分清楚，且随

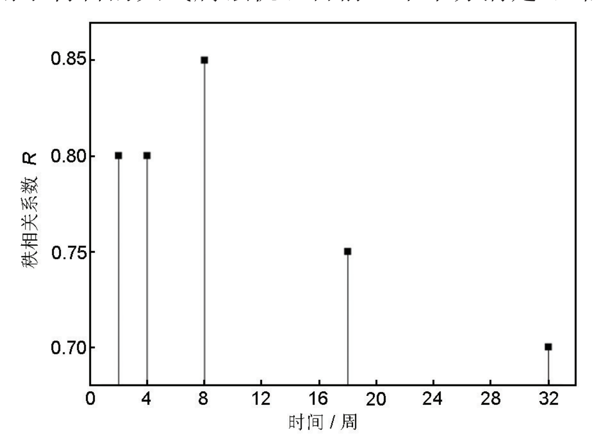


图1 天然海水试验和室内模拟加速试验的秩相关系数

着时间推移而变化，导致材料在大气环境下的腐蚀行为规律及腐蚀机理异常复杂[24]，这也是当前大气腐蚀试验相关性研究的难点所在。

近几十年来，国内外许多研究工作者均在致力于研究室内外大气腐蚀试验的相关性。Boelen等[12]指出，目前室内加速试验与真实大气暴露试验相关性研究效果不甚理想，主要原因归结为两方面：(1) 难以建立确切的腐蚀速率与环境因子的数学关系；(2) 加速试验腐蚀机理与实际环境中的腐蚀机理有可能不同。对此，Jame[25]指出：室内加速腐蚀试验具有两种研究方法，一是室内加速试验不必准确模拟户外大气腐蚀机理，但必须产生足够的加速腐蚀，且具有重复性，这种方法对于质量控制及等级评估是理想的，如我们经常使用的盐雾试验和 SO_2 气体腐蚀试验等；二是考虑多种环境因子的共同作用，较准确模拟材料在户外的腐蚀行为，使户内外腐蚀试验具有良好的相关性，如通过用 10^{-1} mol/L $NaHSO_3$+10^{-2} mol/L NaCl介质作为加速剂[26]，通过间歇式盐水喷雾试验，较好地模拟了Zn在沈阳污染大气环境中的腐蚀行为。

5 材料服役寿命预测研究

5.1 寿命预测研究中的现代数学分析方法

金属材料在长期服役过程中影响材料变质或破坏的因素较多，其作用规律也相对复杂，迄今为止尚未找到能够用来准确描述各种影响因素与材料性能变化之间定量关系的有效方法。目前在材料设计和使用初期还是主要借助于试验手段，然而人们在获得较多的初期试验数据之后，如何充分利用这些数据对材料在不同环境下的服役寿命进行预测，确定仪器设备的最佳维修期和维修方案，这仍然是一项重大的研究课题。为此，国内外腐蚀与防护研究工作者均在这方面做了许多的研究工作，提出了众多的研究方法。当前研究和应用较多的主要有人工神经网络技术和灰色系统理论技术。

人工神经网络是反映人脑结构和功能的一种抽象的数学模型[27]。能够建立一种从网络输入到输出的非线性映射关系，将腐蚀影响因素和腐蚀结果的非线性关系蕴涵在神经网络的拓扑结构中，在腐蚀研究和寿命预测中具有重要的实际意义。1943年，神经生物学家Culloch和青年数学家Pitts[28]提出了第一个人工神经元模型，并在此基础上抽象出神经元的数理模型，开创了人工神经网络的研究。李晓峰等[29]采用人工神经网络技术建立了碳钢、低合金钢在海水潮差区腐蚀预测模型，预测了腐蚀的发展趋势。王海涛[30]用BP神经网络预测了铝合金大气腐蚀，研究了

网络的训练精度和预测精度的关系，建立7-5-1的模型结构。杜翠薇等[31]也根据我国材料自然环境腐蚀网站长期以来积累的海水腐蚀数据，采用BP人工神经网络算法，建立了碳钢及低合金钢的海水腐蚀预测模型。

灰色系统理论是一种用于研究少数据、贫信息的新方法，以“部分信息已知，部分信息未知”的不确定性系统为研究对象，从“部分已知信息”中提取有价值的信息，从而实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效预测。耿刚强等[32]将灰色系统理论引入到钢桥防腐蚀涂层的失效研究中，建立了涂层腐蚀坑剥落的面积随时间变化的GM (1，1) 模型，并在此基础上推导出桥梁防腐蚀涂层寿命的一般预测公式，通过实例分析计算，该模型预测得到的腐蚀面积和实测值相对误差小于8%，具有较好的拟合精度和预测可靠度。刘武等[33]为了对输气管道的腐蚀程度进行预测，运用灰色GM (1，1) 模型对输气管道的腐蚀速率和腐蚀深度的原始数据进行了灰色动态模拟，建立了相应的灰色微分方程和灰色时间响应函数，应用于四川某气田输气管道未来6 a的腐蚀情况预测中；通过对比计算结果和实测数据，误差较小，证明灰色GM (1，1) 模型在管道腐蚀预测中具有一定的应用价值，能为管道运营者采取相应防腐蚀措施提供可靠的依据。

5.2 当前寿命预测研究存在的主要问题及改进研究

材料在大气环境下的腐蚀过程是一种复杂的变质破坏现象，与腐蚀相关的环境因子众多，不同地区或不同时间域内的大气环境数据变化万千，对材料在大气环境作用下的腐蚀行为分析和寿命预测一直都是大气腐蚀研究领域的重点和难点问题。事实上，无论人们应用什么样的分析方法，也很难获得绝对准确的预测结果。但是我们在制定计划和确定材料服役后的最佳维修期往往需要参考不完全准确的预测结果。腐蚀系统是一个广义的能量系统，建立的灰色GM (1，1) 模型是一个指数函数，用来建模的数据较小时，曲线靠近坐标轴，导致预测结果误差较大；对此，王正方等[34]通过对原始数据序列加上100进行平移，然后再从预测结果中扣除增加量的方法得到改进的灰色GM (1，1) 模型，计算结果精度得到进一步提高。

人工神经网络是一个大规模分布式并行处理的非线性系统，它将若干活动规律相同的神经元按照一定的连接方法组成网络结构，该网络通过对给定样本函数的自学习，以一组权重的形式形成网络的稳定状态，从而实现对知识的存储和记忆[35]。神经网络在学习过程中，需要大量的训练样本来保证其计算结果的正确。为此，刘威等[36]根据实际海水材料腐蚀数据，将灰色预测模型GM (1，1) 与径向基神经网络预测模型结合，建立预测碳钢、低合金钢在实际海水环境中平均腐蚀速率的灰色神经网络模型，认为：灰色预测模型对于碳钢、低合金钢的腐蚀速率拟合非常精确，但用于长期预测还有一定缺陷；灰色神经网络模型建模思路清晰，继承了灰色预测模型所需数据量少、神经网络模型的非线性预测计算速度快，精度可控等优点，并且避免了对GM (1，1) 模型的精度检验，灰色神经网络模型可以应用于长期腐蚀数据预测。

6 结语

仅从单一的或仅有的几种研究方法很难深入全面的了解材料在大气环境下的腐蚀过程。户外实际大气暴露腐蚀试验结果具有准确性和实用价值，但试验周期长，室内模拟加速腐蚀试验可以弥补这一点，但室内试验难以模拟室外大气腐蚀的多种复杂因素的综合作用。为改进这一现状，室内加速腐蚀试验正探索向多因素和综合模拟方向发展。

相关性分析技术虽已取得了一些突破和发展，但鉴于相关性分析是一个复杂的问题，还迫切需要进一步深入的研究，如何将现代化的计算机数据处理技术运用到相关性分析中，并同非线性数学分析方法结合起来是未来相关性研究的重点和难点。

人工神经网络技术和灰色系统理论技术在腐蚀科学寿命预测研究中是有效的分析方法，不断加深对人工神经网络技术和灰色系统理论技术等非线性数学分析方法的深入研究，提高材料腐蚀后的分析处理精度，从而深入探索材料大气腐蚀的行为规律，提高预测材料服役寿命的准确性。

参考文献

[1] 王振尧. 金属材料大气腐蚀研究动态 [J]. 全面腐蚀控制, 1995, (4): 1

[2] Christofer L, Thomas E G. Atmospheric Corrosion [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1996

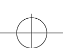
[3] 李兴濂. 我国大气腐蚀网站实验研究回顾及发展建议 [J]. 材料保护, 2000, 33(1): 20

[4] 王凤平, 张学元, 杜元龙. 大气腐蚀研究动态与进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(2): 104

[5] Hou W, Liang C. Eight- year atmospheric corrosion exposure of steels in china [J]. Corrosion, 1999, 55(1): 65

[6] Odnell I, Leygraf C. Seasonal variations in corrosion rate and run-off rate of copper roofs in an urban and a rural atmospheric environment [J]. Corros. Sci., 2001, 432: 379

[7] Odnevall I. Atmospheric corrosion of field exposed zinc-A multi-analytical characterization of corrosion products from initial films to



fully developed layers [D]. Sweden: Royal Institute. Technology., 1994

[8] Pourbaix M. Muylder J, Kissel J, et al. Ailor W H, ed. An Electrochemical Wet and Dry Method for Atmospheric Corrosion Testing, Atmospheric Corrosion [M]. New York: Joha Wiley, 1982

[9] Endoza A R M, Corvo F. Outdoor and indoor atmospheric corrosion of non-ferrous metals [J]. Corros. Sci., 2000, 42(7): 1123

[10] Biestek T, Ailor W H. Ailor W H, ed. Atmospheric Corrosion Testing of Electrodeposited Zinc and Cadmium Coatings, Atmospheric Corrosion [M]. New York: Joha Wiley, 1982

[11] Endoza A R M, Corvo F. Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel [J]. Corros. Sci., 1999, 41(1): 75

[12] Boelen B, Schmitz B, Defourny J, et al. A literature survey on the development of accelerated laboratory test method for atmospheric corrosion of pre-coated steel products [J]. Corros. Sci., 1993, 34 (11): 1923

[13] Glueckert A J. Correlating accelerated tests and outdoor exposure tests for exterior coating gloss [J]. Mater. Perform., 1995, 34(9): 32

[14] Damborenea J. Comparison of accelerated and atmospheric exposure tests for corrosion of aluminum alloy [J]. Br. Corros. J., 1995, 30(4): 292

[15] Johansson E, Gullman J. Kirk W W, Lawson H H, eds. Corrosion Study of Carbon Steel and Zinc-comparison Between Field Exposure and Accelerated Tests, ASTM STP 1239 Atmospheric Corrosion [M]. Philadelphia: ASTM, 1995, 240

[16] Feliu S, Morcillo M, Chico B. Effect of distance from sea on atmospheric corrosion rate [J]. Corrosion, 1999, 55(9): 883

[17] 唐伦科. 自然曝露实验与加速腐蚀实验的相关性及防蚀设计研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006

[18] 文邦伟, 张伦武, 李继红等. 装甲钢自然环境实验与人工加速实验的相关性 [J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 97

[19] 王振尧, 于国才, 韩薇. 钢的大气暴露腐蚀与室内模拟加速腐蚀的相关性 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(2): 70

[20] 王秀静, 陈克勤, 张炬等. 金属大气暴露与模拟加速腐蚀结果相关性探讨 [J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 94

[21] 曾华波, 张慧霞, 邓春龙等. 船体钢室内加速腐蚀和海水腐蚀的相关性研究 [J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 8

[22] 傅立. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992

[23] 牟献良, 田月娥, 汪学华. 碳钢和低合金钢模拟加速实验与大气腐蚀实验的相关性 [J]. 环境技术, 2001, (4): 14

[24] Jacques L F E. Accelerated and outdoor natural exposure testing of coating[J]. Prog. Poly. Sci., 2000, 25: 1337

[25] James M. Short term testing and real time exposure [J]. J. Corros. Sci. Eng., 1999, 9(2): 15

[26] 王振尧, 于国才, 郑逸萍等. 锌的加速腐蚀与大气暴露腐蚀的相关性研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 1999, 19(4): 239

[27] 蒋宗礼. 人工神经网络导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001

[28] MeCulloch W S, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity [J]. Bull. Math. Biophys., 1943, 10(5): 115

[29] 李晓峰, 王海涛, 邵良彬. 基于人工神经网络的碳钢、低合金钢腐蚀预测 [J]. 西安建筑科技大学学报, 2008, 40(6): 885

[30] 王海涛, 韩恩厚, 柯伟. 基于人工神经网络模型的铝合金大气腐蚀的预测 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(5): 272

[31] 杜翠薇, 赵妍妍, 卢琳等. 神经网络在海水腐蚀预测中的应用 [J]. 装备环境工程, 2007, 4(3): 85

[32] 耿刚强, 林杰, 刘来君等. 钢桥防腐蚀涂层寿命的预测方法 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2006, 26(5): 43

[33] 刘武, 季寿红, 兰志林等. 灰色GM(1,1) 在管道腐蚀预测中的应用 [J]. 管道技术与设备, 2008, 5: 52

[34] 王正方, 王勇, 刘秀华. 基于灰色系统理论的常压蒸馏装置腐蚀预测 [J]. 中国石油大学学报, 2010, 34(2): 114

[35] 沙友全, 蒋志强, 孙建华等. 人工神经网络在材料性能预测中的应用 [J]. 郑州航空工业管理学院学报, 2004, 22(4): 43

[36] 刘威, 赵选民, 邓春龙等. 灰色神经网络模型在海水腐蚀预测中的应用 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(4): 201

